

Simulations numériques de l'exposition éolienne de tas de stockage juxtaposés

Catherine Turpin & Jean-luc Harion

École des Mines de Douai
Département Énergétique Industrielle
941, rue Charles Bourseul, BP 10838, 59508 Douai
harion@ensm-douai.fr

Résumé :

Des simulations numériques bidimensionnelles ont été réalisées pour étudier l'exposition éolienne d'un tas de stockage isolé et de deux tas de stockage successifs. Les résultats sont comparés à des mesures en soufflerie issues de la bibliographie. Les simulations reproduisent bien le champ de l'écoulement au dessus du tas isolé et des tas consécutifs, produisant une région de stagnation du fluide à la base du premier tas, une accélération de l'écoulement vers le haut des pentes et une région de séparation et de recirculation dans la partie aval et entre les tas. Cette étude permettra une meilleure quantification des émissions diffuses de particules sur les sites industriels.

Abstract :

Two-dimensional numerical simulations were realised to simulate wind exposure over isolated and closely spaced stockpiles. The results are compared with wind-tunnel experimental data. Results indicate that the model predicts relatively well the flow patterns over isolated pile and over successive piles, producing flow stagnation regions at the toe of the first pile, acceleration up the stoss slope and a region of flow separation and reversal in the lee and between the piles. This study will allow a more accurate evaluation of fugitive dust emissions on industry sites.

Mots-clefs :

CFD ; Émissions diffuses ; Érosion éolienne ; Simulations numériques

1 Introduction

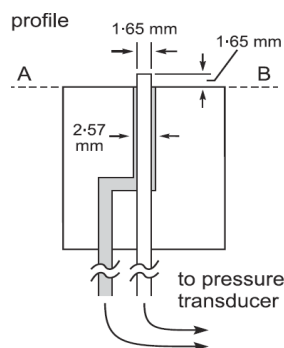
Sur certains sites industriels (sidérurgiques, centrales charbon,...), les émissions diffuses de particules provenant de l'érosion des tas de stockage de matières premières (minerais, charbon,...) peuvent représenter une proportion non négligeable dans le bilan global de la pollution atmosphérique. Ces émissions peuvent être à l'origine de risques environnementaux et sanitaires. L'US EPA (United States Environmental Protection Agency) [1] propose une méthode de quantification des émissions diffuses issues d'un tas à partir d'une cartographie de coefficients d'exposition éolienne exprimés par le rapport u_s/u_r où u_s est la vitesse du vent mesurée à 25 cm au dessus de la surface et u_r la vitesse de référence mesurée à 10 m d'altitude. Le processus d'érosion éolienne dépend fortement de la dynamique d'écoulement du vent, et cette dynamique est très notablement affectée par les changements de géométrie du terrain [2, 3, 4]. Ainsi, la prédiction de la structure de l'écoulement turbulent autour des tas de stockage présents sur les sites joue un rôle considérable dans l'estimation de l'érosion éolienne et l'évaluation de son impact environnemental. Des études ont déjà été entreprises pour étudier l'exposition éolienne de différentes géométries isolées représentatives de tas de stockage avec différentes directions de vent [5, 6, 7].

Cette communication présente les premiers résultats de simulations numériques de l'écoulement sur plusieurs tas consécutifs. Cet aspect est très important car, sur les sites industriels,

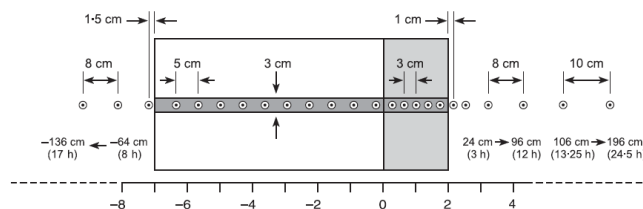
plusieurs tas sont souvent juxtaposés sur les aires de stockage, ce qui perturbe fortement la dynamique de l'écoulement. Il est alors important de bien maîtriser et valider les résultats des simulations numériques sur tous les tas de stockage. Les premières simulations numériques présentées ici ont été réalisées en configurations bidimensionnelles. En effet, si quelques travaux expérimentaux ont été réalisés pour quantifier l'exposition éolienne de tas en configurations tridimensionnelles, ils ne concernent que des situations de tas isolés. A notre connaissance, les seuls travaux expérimentaux concernant des tas multiples ont été réalisés en configuration 2D. Il paraît alors prudent de débiter cette étude par une configuration pour laquelle il existe des données expérimentales de référence bien que, comme l'ont montré des travaux antérieurs [5, 6, 7] le caractère tridimensionnel de l'écoulement autour des tas de stockage joue un rôle majeur. Les résultats de frottement pariétal calculé à partir du code Fluent ainsi que leur comparaison à des données expérimentales issues de la bibliographie sont présentés.

2 Etude expérimentale de référence

Une étude expérimentale menée par Walker et Nickling [3] en soufflerie a permis de mesurer le cisaillement à la surface de tas successifs. L'expérience a été conduite dans une soufflerie de section $0,76m$ de haut $\times 0,92m$ de large $\times 8m$ de long. Les tas ont une hauteur $h = 8\text{ cm}$. Les mesures de frottement pariétal ont été prises depuis $17h$ en amont du sommet du tas jusqu'à $24,5h$ en aval du tas. Les tas s'étendent sur un domaine de $-7h$ à $2h$, en considérant le sommet en zéro. Pour la géométrie incluant deux tas, le second tas se situe à 4 cm ($0,5h$) en aval du premier.



(a) Schéma d'une sonde Irwin [3]



(b) Placement des capteurs pour la configuration à un tas [3]

FIG. 1 – Dispositif expérimental

Dans l'expérience, le cisaillement de surface est mesuré par des capteurs de pression différentielle de type Irwin. Le corps de ces capteurs consiste en un cylindre $2,57mm$ de diamètre agissant comme un capteur de pression superficielle. Au centre de ce capteur, un tube de $1,65mm$ de diamètre agit comme un second capteur de pression, il est situé à $1,65mm$ au-dessus de la surface (Figure 1(a)). Cette sonde, après étalonnage, donne accès à une mesure de frottement pariétal τ_p .

Deux configurations ont été étudiées, un modèle d'un tas isolé et un modèle de deux tas peu espacés. Les deux configurations sont bidimensionnelles : les tas occupent transversalement la totalité de la veine d'essai et sont positionnés perpendiculairement à la direction de

l'écoulement. Pour le tas isolé 49 points de mesures sont répartis entre $-17h$ et $24,5h$ (Figure 1(b)). Pour la configuration à deux tas, 17 points de mesures sont disposés entre les deux sommets.

3 Simulations numériques

3.1 Géométrie, maillage et conditions aux limites

Un calcul numérique bidimensionnel a été mis en œuvre reprenant l'expérience de Walker et Nickling [3]. Les géométries et le maillage ont été réalisés à l'aide du logiciel Gambit. Le domaine de calcul numérique se limite au domaine de prises de mesures (de $-17h$ à $24,5h$). Les conditions d'entrée du domaine sont définies par les profils de vitesse moyenne, de l'énergie cinétique de turbulence k et du taux de dissipation spécifique ω , générés par un premier calcul en canal bidimensionnel. Les conditions d'entrée sont alors caractéristiques d'un écoulement turbulent pleinement développé.

Les conditions aux limites sont précisées sur la figure 2(a). La sortie est définie comme *outflow*, c'est-à-dire que l'écoulement est supposé sans recirculation à cet endroit. Les parois parallèles à l'écoulement, ainsi que les tas, sont définies comme des parois fixes.

Un maillage régulier et structuré a été appliqué, ce maillage a été affiné dans les zones pariétales tout en gardant des rapports d'aspects acceptables afin de calculer correctement les phénomènes de proche paroi autour des tas. La figure 2(b) représente la structure du maillage proche de la paroi.

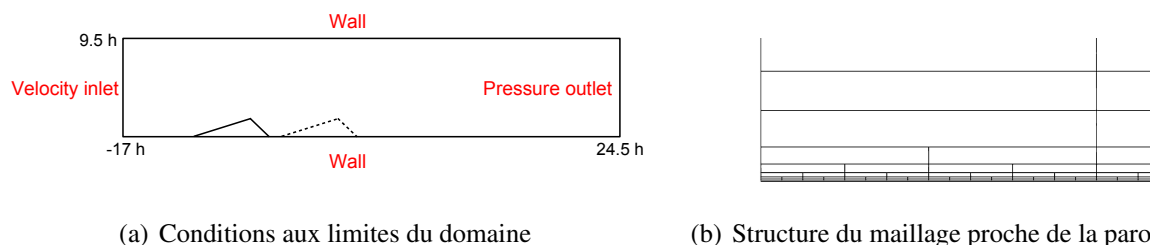


FIG. 2 – Géométrie, maillage et conditions limites

Un test de sensibilité au maillage a été entrepris. Le maillage a été affiné jusqu'à ce que les valeurs des différentes grandeurs calculées deviennent quasi-constantes. La hauteur de la première maille se situe en $y^+ = 2,5$, on dispose ainsi de plusieurs mailles dans la sous couche visqueuse ($y^+ < 5$).

3.2 Modèles de turbulence

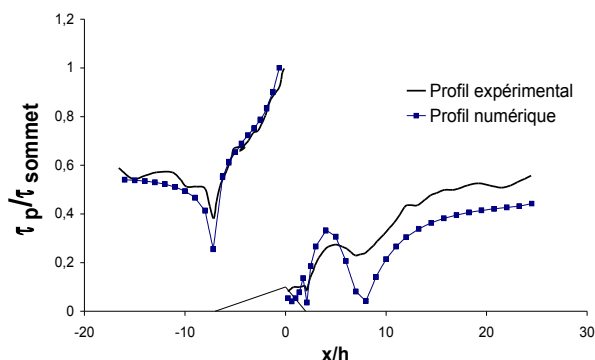
Parmi les nombreux modèles de turbulence proposés par Fluent deux modèles $k-\omega$ *SST* et $k-\epsilon$ *Realizable* ont été testés. Le modèle $k-\omega$ *SST* s'est avéré être le mieux adapté pour notre cas car il présente les résultats de profil de vitesse les plus proche du profil expérimental.

L'option *transitional flow* a été sélectionnée afin d'optimiser les calculs dans la couche limite où se situent les bas nombres de Reynolds. Ceci explique sa meilleure performance vis à vis de l'autre modèle testé.

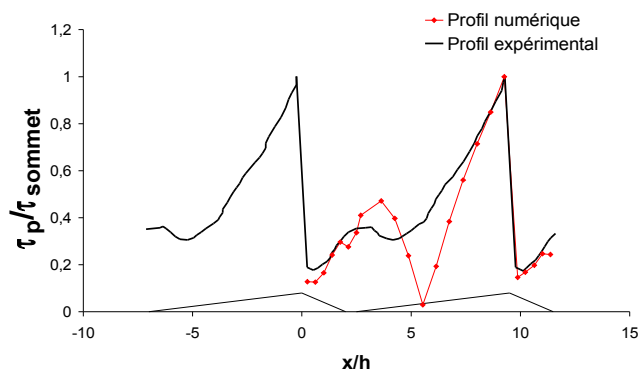
Le schéma de discrétisation utilisé est celui du second ordre pour diminuer les erreurs de diffusion et améliorer la précision du modèle.

3.3 Description et analyse de l'écoulement

Les valeurs numériques sont prises aux points correspondant aux points de mesure expérimentaux en soufflerie.



(a) Tas isolé



(b) Tas successifs

FIG. 3 – τ_p/τ_{sommet} au-dessus des tas

Les figures 3(a) et 3(b) retracent les résultats numériques du rapport τ_p/τ_{sommet} obtenus avec le modèle $k-\omega$ SST et les résultats obtenus expérimentalement par Walker et Nickling pour les configurations du tas isolé et des deux tas successifs.

Il est important de localiser les zones de frottement pariétal élevé proches de la surface des tas de stockage, puisque c'est là où le potentiel d'érosion est le plus élevé. De même, les régions où l'envol est le moins important sont celles qui correspondent au frottement pariétal minimal. Pour les deux configurations, à un tas et à deux tas, les courbes de τ_p/τ_{sommet} montrent que le frottement pariétal diminue à l'approche du tas, cette région est donc peu érodée. Cependant, en raison de la forme concave des lignes de courant dans cette zone, qui selon Wiggs [8] déstabiliserait la structure du flux en transportant les structures turbulentes vers la surface, les particules n'y sont pas susceptibles à la déposition, le transport de sédiments ne s'annule pas.

En remontant la pente, l'écoulement s'accélère près de la surface. La contrainte de frotte-

ment augmente alors jusqu'à un maximum au sommet du tas. Pour les deux configurations, la moitié supérieure de la pente amont est la partie la plus sujette à l'érosion.

L'écoulement, accéléré en remontant la pente du tas, se sépare de la surface au niveau du sommet et crée une zone de recirculation en aval. L'écoulement décélère alors dans cette partie et perd une partie de l'énergie nécessaire au maintien des particules en mouvement. Néanmoins, le flux de recirculation génère un cisaillement significatif (30-40% du τ_{sommet}) dans cette région. A une certaine distance caractéristique, l'écoulement recolle à la surface, la contrainte de frottement y est minimum, mais il y a peu de déposition dans cette région en raison de la forme concave des lignes de courant.

Dans la configuration à deux tas, le point de recollement se situe sur l'amont du second tas, la zone de recollement s'étend sur 5 à 6h contre 7 à 8h dans la configuration du tas isolé. A partir du point de recollement, le frottement pariétal ré-augmente alors jusqu'à son maximum situé au sommet du second tas. Pour la configuration à un tas, ou au niveau du dernier tas de la configuration à tas successifs, après recollement des flux, une couche limite commence à se reconstruire, le frottement pariétal augmente jusqu'au rétablissement de la couche limite.

3.4 Discussion

Qualitativement, les simulations numériques reproduisent l'allure générale de l'écoulement au dessus des tas. Le modèle localise correctement les zones de séparation des flux et les points de recollement des zones de recirculation. Néanmoins, le modèle semble avoir des difficultés à quantifier le frottement pariétal à la base du tas et dans la zone de recirculation. La valeur du $\tau_p/\tau_{\text{sommet}}$ issue des résultats numériques à la base du tas présente un écart d'environ 30% avec le résultat expérimental. Au point de recollement des flux, les valeurs numériques et expérimentales du $\tau_p/\tau_{\text{sommet}}$ diffèrent jusqu'à 80%. Ces différences peuvent être dues au fait que les valeurs expérimentales du frottement pariétal ont été mesurées à l'aide d'un capteur à pression différentielle. Ce capteur a été étalonné dans un écoulement établi de canal. On peut alors s'interroger sur la transposition de la courbe d'étalonnage ainsi obtenue à des mesures dans la zone de recirculation en aval des tas. Pour tenter de lever ce doute, des simulations numériques avec un domaine incluant la géométrie des capteurs (Figure 4) sont en cours afin de valider cette hypothèse. Dans un premier temps, des simulations numériques pour différentes vitesses d'écoulement sur un capteur isolé permettront de définir numériquement la courbe d'étalonnage du capteur Irwin. Par la suite, le frottement pariétal sera calculé à partir de la différence de pression au niveau de chaque capteur, en introduisant ainsi les mêmes méthodes de détermination du frottement pariétal que lors de l'expérience.

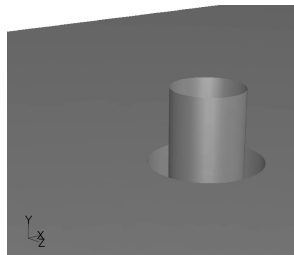


FIG. 4 – Détail de la géométrie de calcul numérique incluant le capteur Irwin

4 Conclusion

Cette étude est consacrée aux problèmes d'érosion éolienne des tas de stockage de matières premières sur sites industriels. Des simulations numériques ont été menées pour étudier l'écoulement autour des tas de stockage. Le frottement pariétal calculé, qui correspond à la donnée centrale vis-à-vis de l'objectif de l'étude, s'approche des données expérimentales en soufflerie. Il est bien reproduit sur la partie amont, cependant en aval un écart entre les calculs et les mesures est observé. Cet écart, en l'état actuel, est attribué pour large part à l'utilisation du système de mesure à pression différentielle dans la zone de recirculation alors qu'il est étalonné en écoulement établi de canal. De nouvelles simulations numériques, tenant compte de la présence de ces capteurs, sont en cours afin de reproduire au mieux les conditions expérimentales et ainsi de retrouver plus exactement les valeurs expérimentales.

Remerciements

Ce travail a été réalisé avec l'aide financière de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et d'ARCELOR (sites de Dunkerque et Fos-sur-Mer).

Références

- [1] EPA. *Miscellaneous Sources*. AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13.
- [2] C.M. Neuman, N. Lancaster, et W.G. Nickling. Relations between dune morphology, air flow, and sediment flux over reversing dunes, Silver Peak, Nevada. *Sedimentology*, 44 :1103–1113, 1997.
- [3] I.J. Walker et W.G. Nickling. Simulation and measurement of surface shear stress over isolated and closely spaced transverse dunes in a wind tunnel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 :1111–1124, 2003.
- [4] J. Xuan et A. Robins. The effects of turbulence and complex terrain on dust emissions and depositions from coal stockpiles. *Atmospheric Environment*, 28 :1951–1960, 1994.
- [5] Th. Badr et J-L. Harion. Simulations numériques de l'exposition éolienne de tas de stockage : implications sur les émissions diffuses. Dans 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, 2006. CD-ROM, Numéro 708.
- [6] Th. Badr et J-L. Harion. Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions. *Atmospheric Environment*, 41 :360–368, 2007.
- [7] Th. Badr et J-L. Harion. Numerical modelling of flow over stockpiles : implications on dust emissions. *Atmospheric Environment*, 39(30) :5576–5584, 2005.
- [8] G.F.S. Wiggs, I. Livingstone, et A. Warren. The role of streamline curvature in sand dune dynamics : evidence from field and wind tunnel measurements. *Geomorphology*, 17 :29–46, 1996.